



## مطالعه تجربی اتصال غیر هم‌جنس آلیاژهای آلومینیوم ۵۰۵۲ و ۷۰۷۵ آنیل شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

حسین افشاری<sup>۱</sup>، امیر اشرفی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۴

### چکیده

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به عنوان یک فرایند حالت جامد، گزینه‌ای مناسب برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم به یکدیگر می‌باشد. در این پژوهش، اتصال غیرهم‌جنس آلیاژهای آلومینیوم ۵۰۵۲ و ۷۰۷۵ آنیل شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر پارامترهای فرایند شامل سرعت دورانی ابزار و سرعت پیشروی بر خواص مکانیکی و دمای فرایند بررسی شد. آزمایش‌ها در سطوح مختلف سرعت دورانی ۴۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۱۰، ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد که انتخاب مناسب پارامترها منجر به تشکیل اتصالاتی عاری از عیوبی نظیر تونل و حفره می‌شود. همچنین بیشترین استحکام کششی اتصالات برابر با ۲۲۴/۲۰ مگاپاسکال بوده که در سرعت دورانی ۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه به دست آمد. بیشترین دمای فرایند، برابر با ۲۵۱/۲۵ درجه سانتی‌گراد و در سرعت دورانی ۱۲۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه ثبت شد. همچنین، بیشینه سختی ویکرز مقطع جوش برابر با ۹۲/۳۷ سختی ویکرز در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه مشاهده گردید.

**کلمات کلیدی:** جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی؛ اتصالات غیر هم‌جنس؛ آلیاژهای آلومینیوم؛ خواص مکانیکی.

## Experimental Study of the Dissimilar Joining of Annealed 5052 and 7075 Aluminum Alloys by Friction Stir Welding

Hossein Afshari<sup>1</sup>, Amir Ashrafi<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> PhD Student, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

<sup>2</sup> Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

### Abstract

Friction stir welding, as a solid-state process, is a suitable option for joining aluminum alloys. In this study, the dissimilar joining of annealed 5052 and 7075 aluminum alloys using the friction stir welding process was investigated, and the effects of process parameters, including tool rotational speed and traverse speed, on the mechanical properties and process temperature were examined. The experiments were carried out at rotational speeds of 400, 800, and 1200 rpm and traverse speeds of 10, 30, and 50 mm/min. Macroscopic examinations showed that appropriate selection of parameters leads to the formation of defect-free joints, free from flaws such as tunnels and voids. Furthermore, the maximum tensile strength of the joints was 224.20 MPa, obtained at a rotational speed of 600 rpm and a traverse speed of 20 mm/min. The highest process temperature, 251.25 °C, was recorded at a rotational speed of 1200 rpm and a traverse speed of 30 mm/min. In addition, the maximum Vickers hardness across the weld cross-section was 92.37 HV, observed at a rotational speed of 1000 rpm and a traverse speed of 20 mm/min.

**Keywords:** Friction Stir Welding; Dissimilar Joints; Aluminum Alloys; Mechanical Properties.

## - مقدمه

پیشرفت‌های اخیر صنایع مختلف دریایی، خودروسازی و هوافضا موجب شده است که استفاده از فلزات سبک با استحکام بالا نظیر آلومینیوم جایگزین مواد سنتی سنگین‌تر شود [۱] و [۲]. آلیاژهای آلومینیوم به دلیل برخورداری از ویژگی‌هایی نظیر نسبت استحکام به وزن بالا، چگالی پایین، مقاومت مناسب در برابر خوردگی رسانایی حرارتی بالا و قابلیت شکل‌پذیری و استحکام نسبتاً بالا در بسیاری از صنایع تولیدی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳-۲].

یکی از چالش‌ها در استفاده صنعتی از آلومینیوم و آلیاژهای آن، ایجاد اتصالات به روش‌های ذوبی است [۵]. این آلیاژها در فرایندهای جوشکاری ذوبی مستعد بروز عیوبی مانند ترک و افت شدید خواص مکانیکی هستند [۶ و ۷]. در این راستا فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>۱</sup> به عنوان یک روش جوشکاری غیر ذوبی، کاربردهای گسترده‌ای در اتصالات آلیاژهای آلومینیوم پیدا کرده است [۸-۱۰].

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از روش‌های جوشکاری حالت جامد<sup>۲</sup> است. این فرایند نخستین بار توسط مؤسسه جوشکاری انگلستان ابداع شد [۱۱ و ۱۲]. در این فرایند چرخش ابزار دورانی غیر مصرفی و حرکت مستقیم آن بر روی فصل مشترک دو صفحه، باعث ایجاد اصطکاک شده و حرارت لازم برای تغییر شکل پلاستیک و اتصال لبه‌ها به یکدیگر را تولید می‌کند [۱۳ و ۱۴]. از این فرایند در صنایع مختلف خودروسازی، هوافضا، صنایع الکترونیکی و صنایع دریایی استفاده می‌شود [۱۵-۱۷]. سادگی در طراحی، دمای پایین فرایند، کیفیت مطلوب اتصالات، نداشتن سرباره، عدم نیاز به الکتروود مصرفی و امکان جوشکاری قطعات غیر هم جنس به یکدیگر از جمله ویژگی‌های فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌باشد [۱۸ و ۱۹].

در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، پارامترهای فرایند الگوی جریان ماده و توزیع حرارت در ناحیه اتصال را تعیین کرده و در نتیجه تأثیر مستقیمی بر استحکام اتصالات خواهند داشت [۲۰-۲۲]. در سال‌های اخیر تحقیقات مختلفی

پیرامون فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم انجام شده است.

چکلیل<sup>۳</sup> و همکاران [۲۳] اثر پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شامل سرعت چرخش ابزار، سرعت پیشروی و زاویه شیب ابزار را بر استحکام تسلیم و کششی اتصالات آلیاژ آلومینیوم AA3003 مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که سرعت چرخش ابزار بیشترین تأثیر را بر خواص مکانیکی دارد و بیشینه استحکام کششی اتصال به حدود ۷۵٪ فلز پایه می‌رسد.

ورما<sup>۴</sup> و همکاران [۲۴] در تحقیقی اتصال لب به لب آلیاژهای آلومینیوم AA5083، AA6081، AA6082 و AA7039 به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق تأثیرات موقعیت قرارگیری آلیاژها در سمت پیش‌رونده و عقب‌رونده بر خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصالات غیر هم جنس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که در تمامی ترکیب‌های بررسی شده، بیشترین استحکام کششی زمانی حاصل می‌شود که آلیاژ با استحکام بالاتر در سمت پیش‌رونده قرار گیرد. بررسی‌های متالورژیکی وجود دو نوع ساختار ماکروسکوپی شامل ساختار نواری و الگوی حلقه پیازی را در ناحیه اغتشاش جوش برای تمامی اتصالات نشان داد. همچنین نتایج آنالیز ایدکس در ناحیه جوش بیانگر آن بود که درصد وزنی عنصر اصلی آلیاژ قرارگرفته در سمت پیش‌رونده در مقایسه با سمت عقب‌رونده بیشتر است.

پاندیان<sup>۵</sup> و همکاران [۲۵] در تحقیقی به مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی و آزمایش‌های تجربی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم AA7075 و AA2014 پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها تطابق مدل شبیه سازی شده و آزمایش‌های تجربی را نشان داد. همچنین بررسی ریزساختاری به وسیله میکروسکوپ نوری و الکترونی، تشکیل الگوی حلقه پیازی مشخصی را در ناحیه اغتشاش شده آشکار ساخت که بیانگر اختلاط مناسب مواد و وقوع تبلور مجدد دینامیکی با دانه‌های ریز هم محور است. تغییرات سختی نیز از ناحیه اغتشاش شده تا فلز پایه مشاهده گردید.

<sup>4</sup> Verma

<sup>5</sup> Pandian

<sup>1</sup> Friction Stir Welding (FSW)

<sup>2</sup> Solid State Welding

<sup>3</sup> Chekalil

مخروطی استوانه‌ای مناسب‌ترین شرایط فرایندی محسوب می‌شوند.

هریبالاجی<sup>۴</sup> و همکاران [۲۹] با استفاده از طراحی آزمایش تأثیرات پارامترهای شامل سرعت چرخش ابزار، سرعت پیشروی جوشکاری، نیروی محوری و زاویه شیب ابزار را بر استحکام کششی و ریزسختی قطعات جوشکاری شده غیر هم جنس آلایزهای آلومینیوم AA2014 و AA7075 به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق به منظور بررسی توپوگرافی سطح از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. نتایج نشان داد که بیشینه استحکام کششی برابر با ۲۱۴ مگاپاسکال در شرایط بهینه شامل سرعت چرخش ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۴۵ میلی‌متر بر دقیقه، نیروی محوری ۶ کیلو نیوتن و زاویه شیب ابزار ۲ درجه به‌دست آمده است.

موتیلال<sup>۵</sup> و کومار [۳۰] در تحقیقی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلایزهای آلومینیوم AA5083-O و AA7075-T6 را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ برای ایجاد ترکیب‌های مختلف پارامترهای جوشکاری استفاده شد. اثر پارامترهای فرایندی بر خواص مکانیکی اتصالات از طریق آزمون‌های کشش و ریزسختی ارزیابی گردید. بررسی‌های ریزساختاری، تشکیل دانه‌های بسیار ریز در ناحیه اغتشاش جوش را نشان داد. در شرایط بهینه، بیشینه استحکام کششی ۴۱۷ مگاپاسکال و بازدهی جوش حدود ۸۱ درصد به‌دست آمد.

همانطور که در ابتدای بخش مقدمه گفته شد، جوشکاری آلومینیوم به دلیل هدایت حرارتی بالا، تمایل به ترک خوردگی و تشکیل سریع لایه اکسیدی، مشکلات منحصر به فردی نسبت به سایر فلزات ایجاد می‌کند. بسیاری از آلایزهای آلومینیوم بدون استفاده از فلز پرکننده به‌سختی جوش‌پذیر هستند. روش‌های سنتی ذوبی نیز اغلب منجر به ایجاد نقص‌هایی در جوش می‌شوند.

این تحقیق به مطالعه‌ی جوشکاری غیر هم‌جنس آلایزهای آلومینیوم ۵۰۵۲ و ۷۰۷۵ آنیل شده به کمک فرایند اصطکاکی اغتشاشی می‌پردازد. با وجود پژوهش‌های متعدد در

خانا<sup>۱</sup> و همکاران [۲۶] در تحقیقی اتصال غیر هم‌جنس آلایزهای آلومینیوم AA6061 T6 و AA8011 H14 تولید شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، تأثیر موقعیت قرارگیری آلایزها در سمت پیش‌رو و عقب‌رو و همچنین آفست ابزار بر خواص مکانیکی، حرارتی و ریزساختاری اتصال بررسی شد. در این تحقیق ارزیابی کیفیت سطحی اتصال از طریق بازرسی چشمی و آزمون رادیوگرافی انجام شد که نتایج آن حاکی از اختلاط مناسب مواد و حداقل عیوب زیرسطحی بود. نتایج آزمون کشش نشان داد که بیشترین استحکام کششی و ازدیاد طول به‌ترتیب برابر با ۷۷/۸۸ مگاپاسکال و ۲۱/۹۶ درصد، زمانی حاصل می‌شود که آلایز نرم‌تر در سمت پیش‌رو قرار گرفته و آفست ابزار به میزان ۱ میلی‌متر به سمت آن اعمال شود.

سراوانان<sup>۲</sup> و همکاران [۲۷] به کمک طراحی آزمایش به روش تاگوجی اتصالات غیر هم‌جنس آلایزهای آلومینیوم AA7020 و AA8014 را به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار دادند. پارامترهای فرایندی انتخاب شده شامل سرعت چرخش ابزار (۱۲۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۶۰۰ دور بر دقیقه)، سرعت پیشروی جوشکاری (۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه) و نیروی محوری (۴، ۶ و ۸ کیلو نیوتن) بودند. نتایج تحلیل استحکام کششی نشان داد که نیروی محوری بیشترین تأثیر را بر استحکام اتصال داشته و بیشینه استحکام کششی برابر با ۱۷۵ مگاپاسکال به‌دست آمده است.

رامشا<sup>۳</sup> و همکاران [۲۸] در تحقیقی، اتصال غیر هم‌جنس آلایزهای آلومینیوم AA7075-O و AA5052-O را به وسیله فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بررسی نمودند. در این پژوهش با استفاده از آنالیز واریانس تأثیرات شکل پین ابزار و سرعت چرخش ابزار بر خواص مکانیکی شامل ریزسختی و استحکام کششی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که برای دستیابی به بیشینه ریزسختی، سرعت چرخش ابزار ۱۲۰۰ دور بر دقیقه و برای بیشینه استحکام کششی، سرعت چرخش ۱۴۰۰ دور بر دقیقه به همراه سرعت پیشروی ۱۲۰ میلی‌متر بر دقیقه، آفست ابزار ۱ میلی‌متر و پین

<sup>4</sup> Haribalaji

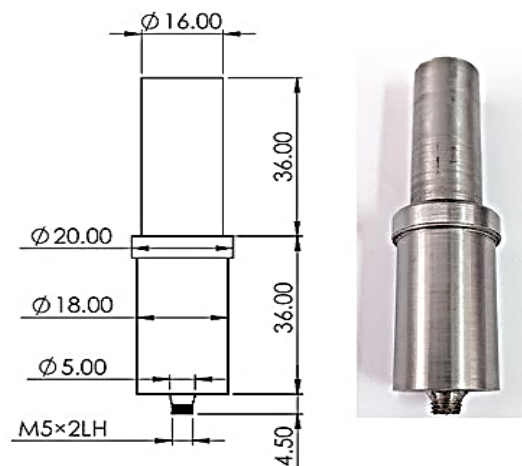
<sup>5</sup> Mothilal

<sup>1</sup> Khanna

<sup>2</sup> Saravanan

<sup>3</sup> Ramesha

مکانیکی این نوع فولاد می باشد. شکل ۲ مشخصات هندسی ابزار مورد استفاده در فرایند را نشان می دهد.



شکل ۲- هندسه ابزار مورد استفاده در فرایند

در این تحقیق برای انجام فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، از ماشین فرز CNC سه محور مدل FP4M استفاده می شود. برای نگهداری قطعات در حین انجام فرایند، فیکسچر دو قسمتی با ابعاد مشخص از جنس فولاد St37 ساخته شد. دو صفحه فیکسچر با قرارگیری صفحات آلومینیومی به صورت لب به لب در میان آنها، توسط شش پیچ آلن M10 به یکدیگر متصل می شوند.

برای اندازه گیری دمای فرایند از سه ترموکوپل نوع K استفاده می شود. این ترموکوپل ها از طریق سوراخ های تعبیه شده با قطر ۵ میلی متر در صفحه پایینی فیکسچر و در طول مسیر جوشکاری، به کف ورق های آلومینیومی چسبیده و دمای فرایند را اندازه گیری می کند. شکل ۳ فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و محل قرار گیری ترموکوپل ها در این تحقیق را نشان می دهد.

زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم، مطالعات محدودی به بررسی اتصال غیر هم جنس آلیاژهای AA5052 و AA7075-O پرداخته اند. به گونه ای که در این تحقیق از ترکیب خاص آلیاژهای غیر گرما سخت شونده و گرما سخت شونده با عملیات آنیل کاری هدفمند پیش از جوشکاری استفاده شده است. همچنین بسیاری از تحقیقات انجام شده اغلب بر یک یا دو شاخص مکانیکی متمرکز بوده و تحلیل جامعی از رفتار حرارتی، مکانیکی و ساختاری فرایند ارائه نکرده اند. در حالی که این تحقیق به بررسی هم زمان تأثیر پارامترهای فرایندی بر سه پاسخ شامل استحکام کششی، دمای فرایند و سختی مقطع جوش می پردازد.

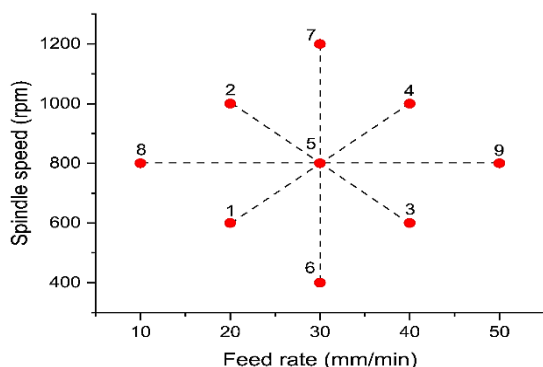
## ۲- روش تحقیق

برای انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از ورق های آلومینیومی ۷۰۷۵ آنیل شده و ۵۰۵۲ استفاده شد. بدین منظور ابتدا ورق های آلومینیومی در ابعاد ۱۲۰ × ۱۰۰ × ۵ میلی متر ماشینکاری شدند. جدول ۱ ترکیب شیمیایی این دو آلیاژ را نشان می دهند.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلومینیوم ۵۰۵۲ و ۷۰۷۵

| Al 5052     | Al 7075O    | آلیاژ آلومینیوم |
|-------------|-------------|-----------------|
| -           | ۰/۴         | Na              |
| ۰/۱         | ۵/۱ - ۶/۱   | Zn              |
| ۰/۱۵ - ۰/۳۵ | ۰/۱۸ - ۰/۲۸ | Cr              |
| ۲/۲ - ۲/۸   | ۲/۱ - ۲/۹   | Mg              |
| ۰/۱         | ۰/۳         | Mn              |
| ۰/۱         | ۱/۲ - ۲     | Cu              |
| ۰/۴         | ۰/۵         | Fe              |
| ۰/۲۵        | ۰ - ۰/۴     | Si              |
| باقیمانده   | باقیمانده   | Al              |

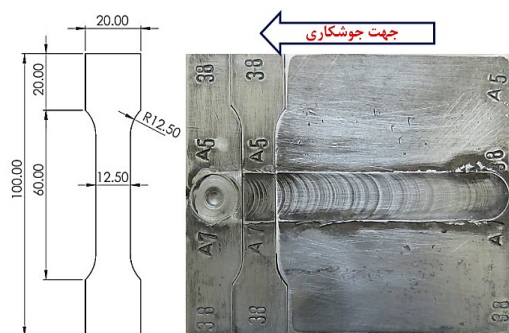
در این تحقیق برای انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، از ابزار با قطر شانه ۱۸ میلی متر و پین مخروطی رزوه دار M5 چپ گرد با ارتفاع ۴/۶ میلی متر و از جنس فولاد VCN150 استفاده شد. مقاومت بالا در برابر سایش، استحکام و قابلیت تحمل بارگذاری های خمشی و پیچشی از جمله خواص



شکل ۴- الگوی آزمایش‌های تجربی انجام شده در این تحقیق

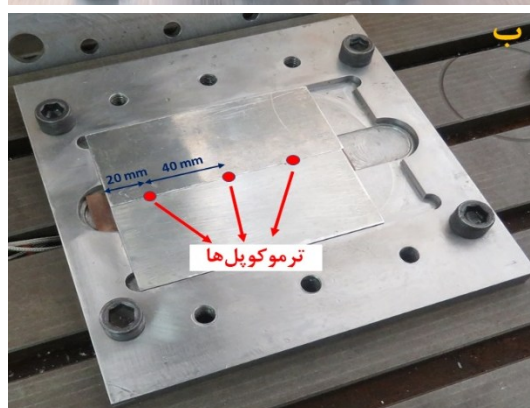
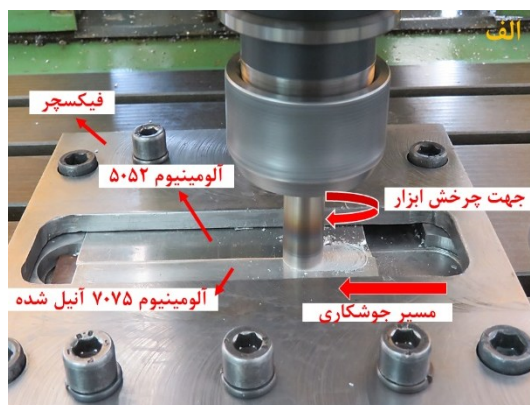
زاویه انحراف ابزار نیز در تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر با مقدار ۱ درجه تعیین شد.

در این تحقیق برای بررسی استحکام اتصالات و نیز سختی مقطع جوش از آزمایش‌های کشش و میکروسختی ویکرز استفاده می‌شود. برای انجام آزمایش کشش از هر نمونه جوشکاری شده، یک نمونه کشش به صورت عرضی و عمود بر مسیر جوشکاری مطابق با استاندارد ASTM-E8 با کمک دستگاه وایرکات بریده شد. آزمایش کشش به کمک دستگاه زوییک و در دمای اتاق انجام گرفت. سرعت انجام آزمایش برای تمام نمونه‌ها برابر با ۱ میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد. شکل ۵ ابعاد نمونه کشش مطابق با استاندارد مذکور و محل برش نمونه روی ورق‌های آلومینیومی را نشان می‌دهد.



شکل ۵- ابعاد تست کشش مطابق با استاندارد ASTM-E8 و محل برش نمونه‌های کشش روی ورق‌های آلومینیومی

برای انجام آزمایش میکروسختی، آماده سازی نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM E3-11 انجام شد. در این استاندارد،



شکل ۳- الف) فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی  
ب) محل قرار گیری ترموکوپل‌ها

در ادامه به منظور مطالعه‌ی استحکام کششی اتصالات جوشکاری شده و نیز سختی مقطع جوش، پارامترهای سرعت دورانی ابزار و سرعت پیشروی مورد بررسی قرار می‌گیرند. تعیین مقادیر این پارامترها به کمک مطالعه‌ی تحقیقات قبلی و آزمایش‌های تجربی اولیه انجام گرفت. جدول ۲ سطوح این پارامترها را نشان می‌دهد.

جدول ۲- سطوح پارامترهای مورد آزمایش

| پارامتر                  | مقدار                         |
|--------------------------|-------------------------------|
| سرعت دورانی<br>(Rev/min) | ۴۰۰ - ۶۰۰ - ۸۰۰ - ۱۰۰۰ - ۱۲۰۰ |
| سرعت پیشروی<br>(mm/min)  | ۱۰ - ۲۰ - ۳۰ - ۴۰ - ۵۰        |

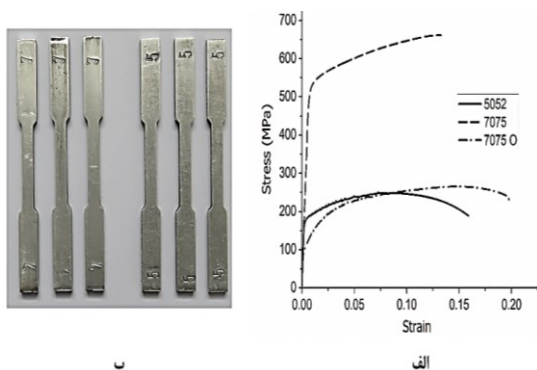
سطوح این پارامترها براساس مطالعات قبلی و آزمایش‌های تجربی اولیه تعیین شدند. شکل ۴ الگوی آزمایش‌های تجربی انجام شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

### ۳- بحث و نتایج

اختلاف استحکام و سختی دو آلیاژ ذکر شده، باعث ایجاد ترک‌های بزرگ و جدایش در مرز دو آلیاژ و نیز موجب شکستن متوالی ابزار در حین فرایند جوشکاری می‌شود. به همین دلیل ورق‌های آلومینیومی ۷۰۷۵ در دمای ۴۱۵ درجه به مدت ۱۵۰ دقیقه آنبیل شدند. در ادامه آزمایش‌های کشش بر روی نمونه‌های آلومینیوم مورد استفاده در این تحقیق انجام گرفت. جدول ۳ و شکل ۱ به ترتیب بیشترین استحکام کششی استخراج شده و منحنی‌های تنش-کرنش آزمایش کشش نمونه‌های ۷۰۷۵ آنبیل شده و ۵۰۵۲ را نشان می‌دهند.

جدول ۳- بیشترین استحکام کششی استخراج شده از آزمایش کشش

| آلیاژ آلومینیوم | بیشترین استحکام (MPa) |
|-----------------|-----------------------|
| ۵۰۵۲            | ۲۴۴/۰۹                |
| ۷۰۷۵ آنبیل شده  | ۲۵۱                   |



شکل ۱- (الف) منحنی تنش-کرنش (ب) نمونه‌های تست کشش مطابق با استاندارد ASTM E8

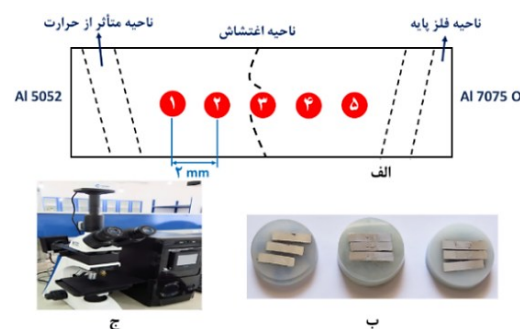
### ۳-۱- بررسی تأثیرات پارامترها

جدول ۴ نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌های جوشکاری شده و دمای اندازه‌گیری توسط ترموکوپل در ناحیه نمونه کشش و نیز میانگین و بیشترین میزان سختی ویکرز به دست آمده در مقطع جوش را نشان می‌دهد. مطابق با جدول ۴، ستون بیشترین سختی، در واقع بیشترین مقدار سختی اندازه‌گیری شده در ناحیه اغتشاش جوش و ستون میانگین

روش‌های برش، مانت کاری، سنباده‌زنی، پولیش کاری و اچ کاری نمونه‌ها به صورت جامع تشریح شده است. مراحل آماده سازی به ترتیب شامل موارد زیر بود:

- الف) برش: نمونه‌ها با استفاده از دستگاه برش وایرکات از مقطع عرضی اتصالات جوشکاری شده بریده شدند.
- ب) مانت کاری: نمونه‌ها با استفاده از رزین اپوکسی به صورت سرد مانت شدند.
- ج) سنباده‌زنی: عملیات سنباده‌زنی در دانه‌بندی‌های مختلف ۳۲۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ انجام شد.
- د) پولیش کاری: پولیش کاری با استفاده از محلول آلومینا تا رسیدن به سطح آینه‌ای صورت گرفت.
- ه) اچ کاری: اچ کاری نمونه‌ها با محلول کلر (شامل ۲ میلی لیتر  $\text{HNO}_3$  و ۱ میلی لیتر HF و ۳ میلی لیتر HCl و ۱۹۰ میلی لیتر  $\text{H}_2\text{O}$ ) به مدت ۳۰ ثانیه انجام شد.

آزمون میکروسختی ویکرز بر اساس استاندارد ASTM E384-22 انجام شد. در این آزمون از روش سختی سنجی ویکرز نوع ۰/۰۵ HV استفاده شد. در این آزمایش، نیروی اعمالی ۵۰ گرم و زمان اعمال نیرو ۱۰ ثانیه می‌باشد. آزمون‌ها با دستگاه میکروسختی مدل JENUS و در دمای اتاق انجام شد. به منظور ارزیابی سختی ناحیه جوش، از هر نمونه پنج نقطه در مرکز مقطع جوش و با فاصله تقریبی ۲ میلی متر نسبت به یکدیگر انتخاب شد. مقادیر اندازه‌گیری شده، مناطق تحت تأثیر ترمومکانیکی موضعی و ناحیه اغتشاش را نشان می‌دهند. شکل ۶ نمونه‌های آماده شده برای انجام آزمایش میکروسختی و محل انجام آزمایش در مقطع جوش هر یک از این نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۶- (الف) طرح‌واره مقطع جوش و موقعیت انجام آزمایش میکروسختی (ب) نمونه‌های آزمایش میکروسختی (ج) دستگاه میکروسختی مدل JENUS

سختی، در واقع میانگین سختی پنج نقطه اندازه‌گیری شده در این ناحیه را نشان می‌دهد.

جدول ۴- آزمایش‌های طراحی شده نتایج استخراج شده

| شماره آزمایش | سرعت دورانی (Rev/min) | سرعت پیشروی (mm/min) | بیشترین دما (°C) | بیشترین سختی (HV) | میانگین سختی (HV) | استحکام نهایی (MPa) | نسبت استحکام به پایه آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده | نسبت استحکام به استحکام نهایی فلز پایه |
|--------------|-----------------------|----------------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------|
| ۱            | ۶۰۰                   | ۲۰                   | ۱۹۵/۷۵           | ۸۸/۷۲             | ۷۷.۱۹             | ۲۲۴/۲۰              | ۹۱/۵۵                                        | ۸۹/۳۲                                  |
| ۲            | ۱۰۰۰                  | ۲۰                   | ۲۴۰/۲۵           | ۹۲/۳۷             | ۸۱.۹۷۶            | ۲۱۴/۶۵              | ۸۷/۶۵                                        | ۸۵/۵۲                                  |
| ۳            | ۶۰۰                   | ۴۰                   | ۱۴۲              | ۸۸/۳۶             | ۸۳.۶۵             | ۲۰۷/۳۴              | ۸۴/۶۶                                        | ۸۲/۶۱                                  |
| ۴            | ۱۰۰۰                  | ۴۰                   | ۲۱۴              | ۸۳/۳۶             | ۷۶.۹۱۸            | ۱۸۵/۸۸              | ۷۵/۹۰                                        | ۷۴/۰۵                                  |
| ۵            | ۸۰۰                   | ۳۰                   | ۲۱۶              | ۸۶/۸۹             | ۸۳.۷۱۸            | ۲۱۹/۹۹              | ۸۹/۸۳                                        | ۸۷/۶۴                                  |
| ۶            | ۴۰۰                   | ۳۰                   | ۱۴۵              | ۷۷/۶۳             | ۷۵.۰۹۶            | ۷۲/۸۳               | ۲۹/۷۴                                        | ۲۹/۰۱                                  |
| ۷            | ۱۲۰۰                  | ۳۰                   | ۲۵۱/۲۵           | ۸۸/۷۲             | ۸۲.۷۰۲            | ۲۰۱/۲۹              | ۸۲/۱۹                                        | ۸۰/۱۹                                  |
| ۸            | ۸۰۰                   | ۱۰                   | ۲۴۲/۵۰           | ۸۰/۵۷             | ۷۳.۵۷۸            | ۲۱۲/۸۶              | ۸۶/۹۲                                        | ۸۴/۸۰                                  |
| ۹            | ۸۰۰                   | ۵۰                   | ۲۱۷              | ۷۲/۴۶             | ۷۰.۸۹۲            | ۱۸۴/۵۸              | ۷۵/۴۰                                        | ۷۳/۵۴                                  |

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، نمونه‌هایی که در آن‌ها دمای ثبت شده توسط ترموکوپل در بازه متوسط قرار دارد، بیشترین استحکام کششی را دارند. علت این موضوع آن است که در این شرایط، انرژی ورودی کافی برای ایجاد تبلور مجدد دینامیکی و ریزدانه‌سازی در ناحیه اغتشاش فراهم می‌شود، بدون آن‌که دمای بیش از حد موجب رشد دانه یا ناپایداری ریزساختار شود.

لازم به ذکر است که مقادیر دمای ثبت شده توسط ترموکوپل‌ها به دلیل چند عامل ساختاری و محیطی کمتر از دمای واقعی ناحیه اغتشاش هستند. نخست آن‌که تمامی آزمایش‌ها در فصل زمستان و در دمای محیط پایین انجام شده که این امر اتلاف حرارت را افزایش می‌دهد. دوم اینکه ترموکوپل‌ها در بخش زیرین قطعه نصب شده‌اند و از قسمت کف ورق دما را اندازه‌گیری کرده‌اند. این ناحیه به طور طبیعی سردتر از سطح بالایی نزدیک به شانه ابزار است. به منظور بررسی کمی میزان تأثیر هر یک از پارامترهای فرایندی بر خواص اتصالات، تحلیل اثرگذاری بر اساس نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شد.

مطابق با نتایج جدول ۴، سرعت دورانی ابزار بیشترین تأثیر را بر بیشترین استحکام کششی اتصالات دارد. افزایش سرعت دورانی از ۴۰۰ به ۸۰۰ دور بر دقیقه، استحکام کششی را تا حدود ۳۰۰ درصد افزایش می‌دهد. این امر ناشی از بهبود

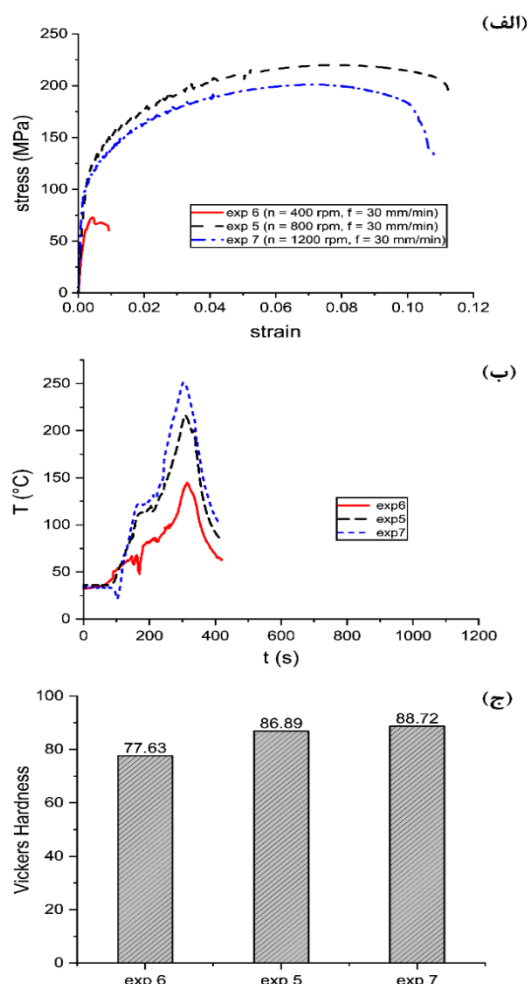
اختلاط مواد و تشکیل پیوند مناسب‌تر در فصل مشترک دو آلیاژ است. سرعت پیشروی تأثیر کمتری بر استحکام کششی دارد. افزایش سرعت پیشروی از ۱۰ به ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه، استحکام کششی را حدود ۱۳ درصد کاهش می‌دهد. علت این امر، کاهش زمان اختلاط مناسب مواد و تشکیل عیوبی نظیر تونل در فصل مشترک است.

در خصوص دمای فرایند، سرعت دورانی تأثیر غالب دارد و افزایش آن از ۴۰۰ به ۱۲۰۰ دور بر دقیقه، دما را تا ۷۳ درصد افزایش می‌دهد. این یافته با نتایج پژوهش‌های ورما و همکاران [۲۴] و موتیلال و کومار [۳۰] همخوانی دارد.

در مورد سختی مقطع جوش، سرعت پیشروی تأثیر بیشتری دارد. افزایش سرعت پیشروی تا ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه، سختی را بهبود می‌دهد. اما افزایش بیشتر تا ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه، سختی را حدود ۱۷ درصد کاهش می‌دهد. بیشینه سختی در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه مشاهده شد که با وقوع تبلور مجدد دینامیکی و تشکیل ریزدانه‌ها قابل توجیه است. این یافته با نتایج چکلیل و همکاران [۲۳] همخوانی دارد.

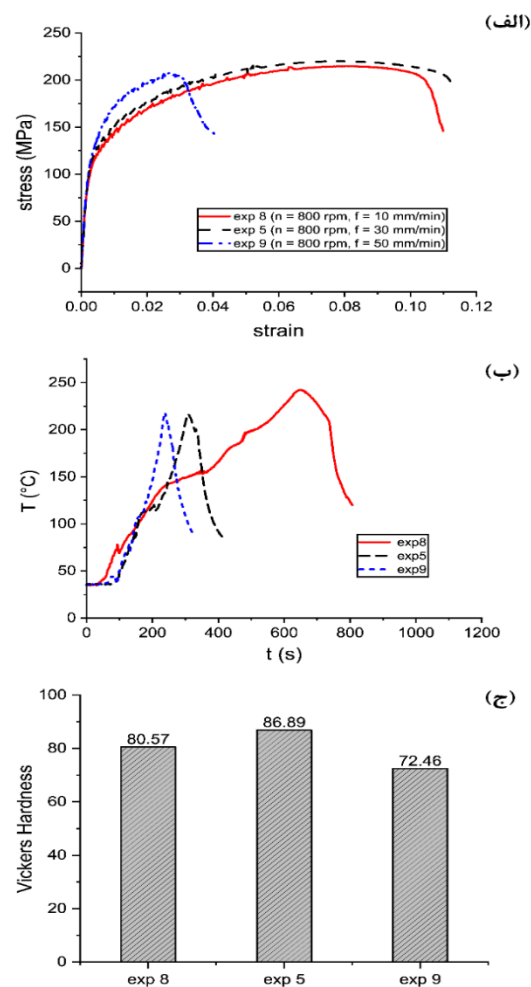
شکل ۷ بیشترین سختی و یکرز، منحنی تنش - کرنش و نیز دمای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌ها را برای سه نمونه با سرعت دورانی ثابت نشان می‌دهد.

شکل ۸ بیشترین سختی ویکرز، منحنی تنش - کرنش و دمای اندازه گیری شده توسط ترموکوپل ها را برای سه نمونه با سرعت پیشروی ثابت نشان می دهند.



شکل ۸- نمونه ها با سرعت پیشروی ثابت: (الف) منحنی تنش-کرنش (ب) دمای اندازه گیری شده (ج) سختی ویکرز

مطابق با شکل ۸ و جدول ۲ می توان گفت که افزایش سرعت دورانی باعث افزایش اصطکاک و اختلاط مواد شده و در نتیجه دمای فرایند و سختی ویکرز مقطع جوشکاری شده را افزایش می دهد. همچنین افزایش سرعت دورانی ابزار تا مقدار ۸۰۰ دور بر دقیقه باعث افزایش استحکام کششی شده و پس از آن استحکام کششی اتصالات را کاهش می دهد. این رفتار به دلیل افزایش نرخ تولید حرارت و به دنبال آن، بهبود



شکل ۷- نمونه ها با سرعت دورانی ثابت: (الف) منحنی تنش-کرنش (ب) دمای اندازه گیری شده (ج) سختی ویکرز

مطابق با شکل ۷ و جدول ۲ می توان گفت که افزایش سرعت پیشروی تا مقدار ۳۰ میلی متر بر دقیقه باعث افزایش سختی شده و پس از آن موجب کاهش سختی در مقطع جوش می شود. افزایش سرعت پیشروی باعث کاهش استحکام کششی اتصالات می شود. در این شرایط زمان کافی برای جریان مناسب مواد و پر شدن حفرات فراهم نمی شود. در نتیجه، فصل مشترک دو آلیاژ پیوند ضعیفی تشکیل می دهد و استحکام کششی کاهش می یابد. همچنین افزایش سرعت پیشروی، زمان تماس شانه ابزار با ماده را کاهش داده و تولید حرارت کمتری صورت می گیرد.

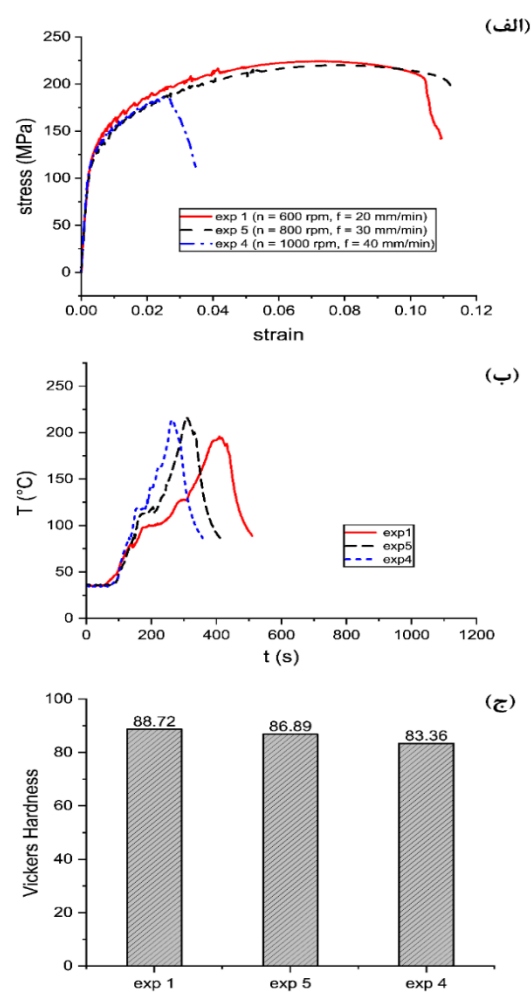
مطابق با شکل ۹ و جدول ۲ می‌توان گفت که افزایش هم‌زمان سرعت دورانی ابزار و سرعت پیشروی باعث کاهش سختی و استحکام کششی اتصالات می‌شود. علت این امر را پایداری در ناپایداری جریان مواد دانست. سرعت دورانی بالا باعث چرخش سریع ماده می‌شود، در حالی که سرعت پیشروی زیاد زمان کافی برای اختلاط و اغتشاش مواد را فراهم نمی‌کند. نتیجه این عدم تعادل، ایجاد عیوبی مثل حفره‌های ریز و پیوند ناقص در فصل مشترک دو آلیاژ آلومینیوم است. این ناحیه‌های ضعیف به محل تمرکز تنش تبدیل شده و در نهایت استحکام کششی اتصالات و سختی مقطع جوش علی‌رغم بالا بودن پارامترهای فرایندی، کاهش می‌یابد.

همچنین افزایش هم‌زمان سرعت دورانی ابزار و سرعت پیشروی، دمای اندازه‌گیری شده فرایند را نیز افزایش می‌دهد. چون نرخ تولید حرارت در ناحیه تماس ابزار و ماده به طور مستقیم با سرعت دورانی مرتبط است، با بالا رفتن سرعت دورانی، میزان اصطکاک و همچنین شدت تغییر شکل پلاستیک افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه گرمای بیشتری در واحد زمان تولید می‌شود.

شکل ۱۰ بیشترین سختی ویکرز، منحنی تنش - کرنش و دمای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌ها را برای سه نمونه با افزایش پیشروی و کاهش سرعت دورانی را نشان می‌دهند.

اختلاط پلاستیک بین آلیاژهای ۵۰۵۲ و ۷۰۷۵ است. در سرعت‌های بالاتر، تولید حرارت بیش از حد منجر به نرم شدن بیش از حد ماده و کاهش کیفیت ناحیه اغتشاش شده و افت استحکام را به دنبال دارد. شکست نمونه‌ها عمدتاً از ناحیه آلیاژ ۵۰۵۲ یا مرز مشترک آغاز شده که با رفتار نرم‌تر این آلیاژ تحت شرایط حرارتی بالا سازگار است.

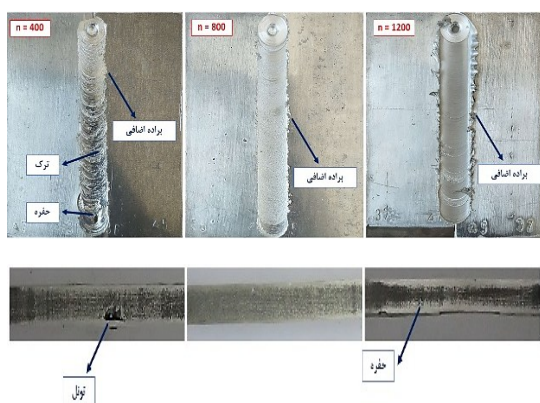
شکل ۹ بیشترین سختی ویکرز، منحنی تنش - کرنش و دمای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌ها را برای سه نمونه با افزایش هم‌زمان سرعت دورانی و پیشروی را نشان می‌دهند.



شکل ۹ - نمونه‌ها با افزایش هم‌زمان سرعت دورانی و پیشروی: (الف) منحنی تنش-کرنش (ب) دمای اندازه‌گیری شده (ج) سختی ویکرز

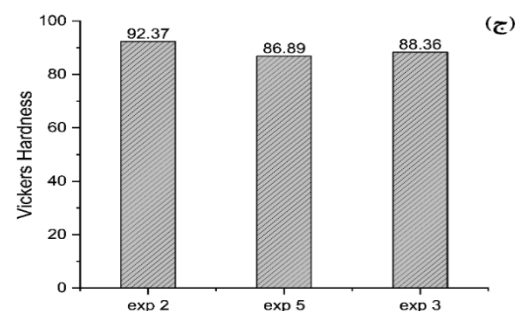
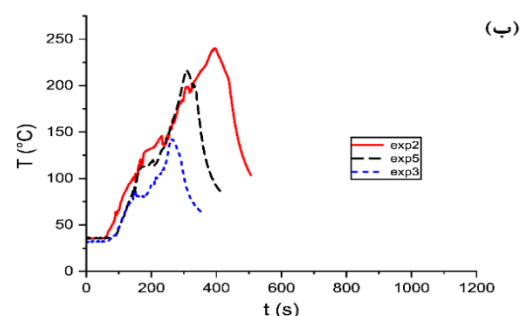
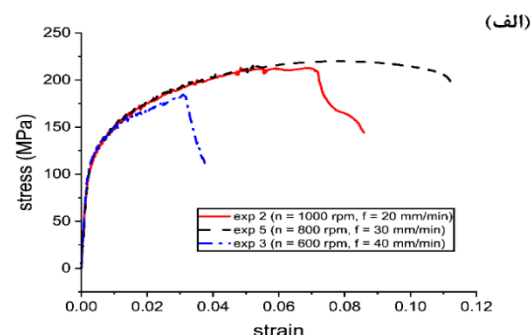
### ۲-۳- بررسی ماکرو ساختار

برای بررسی شکل ظاهری اتصالات جوشکاری شده آلومینیوم ۵۰۵۲ و ۷۰۷۵ آنیل شده به کمک فرایند اصطکاکی اغتشاشی، بازرسی چشمی از نمونه‌ها انجام گرفت. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب سطح و مقطع اتصال جوشکاری شده آلومینیوم ۵۰۵۲ و ۷۰۷۵ آنیل شده برای سرعت‌های دورانی و پیشروی مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- تصاویر ماکروسکوپی سطح و مقطع اتصالات جوشکاری شده A7075 O و A5052 برای سرعت‌های دورانی مختلف

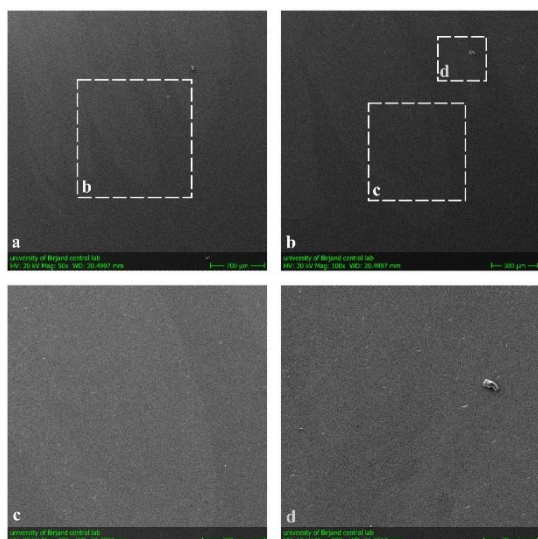
همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، ظاهر جوش در سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه نسبتاً خوب است. بررسی مقطع عرضی اتصال جوش نشان می‌دهد، قطعه جوشکاری شده فاقد عیوب تونلی و ترک است. کاهش سرعت دورانی تا ۴۰۰ دور بر دقیقه، منجر به ایجاد عیوب مختلفی نظیر تونل، حفره و ترک‌های سطحی و زیر سطحی در ناحیه جوشکاری شده می‌شود. وجود این عیوب ناشی از سرعت دورانی پایین و در نتیجه اختلاط ناکافی مواد و جریان کم ماده در ناحیه جوش می‌باشد. افزایش سرعت دورانی تا ۱۲۰۰ دور بر دقیقه، باعث می‌شود ماده بیش از حد پلاستیک و نرم شود. در نتیجه، ماده نرم شده تحت فشار شانه ابزار به بیرون رانده می‌شود و براده اضافی در اطراف خط جوش تشکیل می‌شود. در مقطع جوش نیز حفره‌های بسیار ریزی مشاهده می‌شود که ناشی از نرم شدگی و جابجایی مواد می‌باشد.



شکل ۱۰- نمونه‌ها با افزایش پیشروی و کاهش سرعت دورانی: (الف) منحنی تنش-کرنش (ب) دمای اندازه‌گیری شده (ج) سختی ویکرز

مطابق با شکل ۱۰ و جدول ۲ می‌توان گفت که تغییرات هم‌زمان افزایش سرعت پیشروی و کاهش سرعت دورانی باعث ایجاد اختلاط کمتر مواد و اصطکاک پایین شده و دمای فرایند را کاهش می‌دهد. با کاهش دما، سختی مقطع جوشکاری شده نیز کاهش می‌یابد. میزان تغییرات استحکام کششی اتصالات نیز ناچیز می‌باشد.

شکل ۱۳ تصاویر SEM مقطع جوش آزمایش شماره ۲ را نشان می‌دهد.

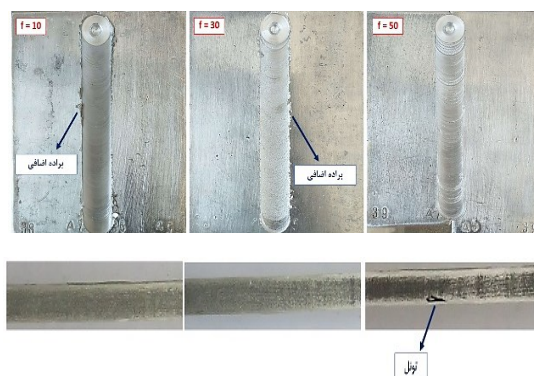


شکل ۱۳- تصاویر SEM مقطع جوش آزمایش شماره ۲

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه، اتصال ایجاد شده بین دو آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده و ۵۰۵۲ از نوع اختلاط مکانیکی است. به نحوی که آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده در سمت پیش‌رونده به‌صورت زبانه‌های تیز درون آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ نفوذ کرده و الگوی قفل شدگی مکانیکی را ایجاد کرده است. با وجود این نفوذ موضعی، مرز اتصال همچنان قابل تشخیص است.

مشاهده این مورفولوژی در وسط ضخامت مقطع جوش نشان می‌دهد که مرز ایجاد شده در جوش تحت جابه‌جایی مواد در اطراف پین بوده و انتقال ماده از سمت پیش‌رونده به‌طور مؤثر رخ داده است.

با توجه به اهمیت ناحیه فصل مشترک دو آلیاژ آلومینیوم غیر هم‌جنس در استحکام کششی اتصالات جوشکاری شده، ترکیب شیمیایی این ناحیه با استفاده از آزمایش آنالیز پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDS) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده در شکل ۱۴ و جداول ۴ و ۵ ارائه شده است.



شکل ۱۲- تصاویر میکروسکوپی سطح و مقطع اتصالات جوشکاری شده A5052 و A7075 O برای سرعت‌های پیشروی مختلف

با توجه به شکل ۱۲ می‌توان گفت که، اتصال جوشکاری شده در سرعت پیشروی ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه فاقد هرگونه عیوب مختلف است. کاهش سرعت پیشروی تا ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه موجب افزایش زمان فرایند شده و در نتیجه اختلاط مواد بهتر انجام می‌شود. این امر موجب بهبود کیفیت سطح جوشکاری شده می‌شود. افزایش سرعت پیشروی تا مقدار ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه باعث لغزش شانه ابزار بر روی سطح قطعات می‌شود. در این شرایط ماده فرصت کافی برای پر کردن حفره و تونل را ندارد. این امر موجب ایجاد تونل‌های نسبتاً بزرگی در مقطع جوش می‌شود.

### ۳-۳- بررسی میکروساختار

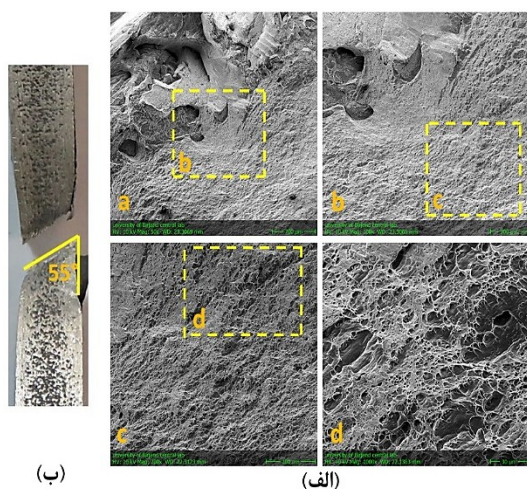
به منظور برای بررسی بهتر نمونه با استحکام کششی مطلوب و سختی بالا، از مقطع جوش تصاویری به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱</sup> (SEM) گرفته شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع جوش و مقطع شکست نمونه آزمایش کشش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی KYKY-EM8000 انجام شد. همچنین آنالیز عنصری ناحیه فصل مشترک دو آلیاژ به روش پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDS) نیز با استفاده از همین دستگاه انجام گرفت.

<sup>۱</sup> Scanning Electron Microscope

۷۰۷۵ آنیل شده و ۵۰۵۲ نشان داد که ترکیب شیمیایی هر آلیاژ تا حد زیادی حفظ شده است.

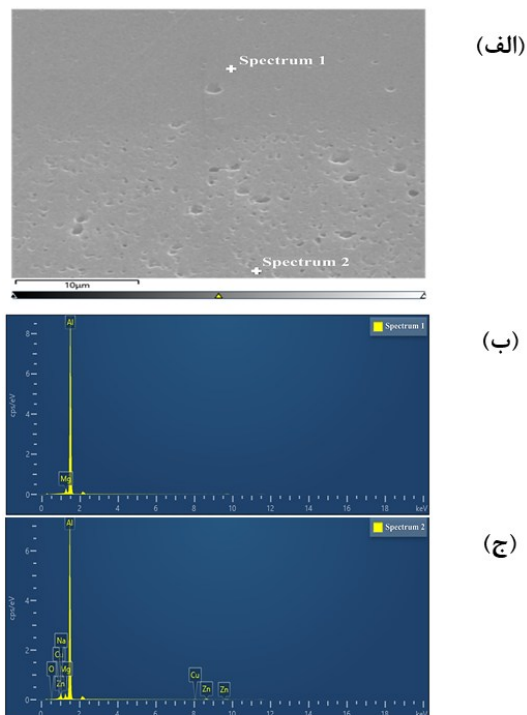
نقطه واقع در سمت آلومینیوم ۵۰۵۲ عمدتاً شامل آلومینیوم و منیزیم بوده و فاقد عناصر روی و مس است که بیانگر اختلاط شیمیایی محدود در این ناحیه می باشد. در مقابل، نقطه واقع در سمت آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده حاوی مقادیر قابل توجه روی، منیزیم و مس بوده که با جدول ترکیب شیمیایی این آلیاژ هم خوانی دارد. این نتایج در کنار شکل ۱۳ تأیید می کند که نفوذ زبانه ای مشاهده شده در فصل مشترک اتصال جوشکاری شده، عمدتاً ناشی از انتقال مکانیکی ماده و جریان پلاستیک نامتقارن بوده و شامل نفوذ گسترده عناصر آلیاژی نمی شود.

برای بررسی بهتر نوع شکست در نمونه های آزمایش کشش، تصویر SEM از مقطع نمونه کشش شماره ۴ و نیز تصویر ماکروسکوپی از زاویه شکست این نمونه گرفته شد. شکل ۱۵ تصاویر SEM مقطع جوش و نیز تصویر ماکروسکوپی زاویه شکست نمونه کشش شماره ۴ را نشان می دهد.



شکل ۱۵- نمونه شماره ۴: (الف) تصاویر SEM مقطع شکست آزمایش کشش (ب) تصویر ماکروسکوپی زاویه شکست نمونه

همان طور که در شکل ۱۵ مشاهده می شود، سطح شکست دارای دو الگوی شکست نرم و شکست ترد است. در نواحی مختلف سطح شکست، تعداد قابل توجهی دیمل (فرورفتگی) با اندازه ها و عمق های متفاوت مشاهده می شود.



شکل ۱۴- آنالیز EDS به کمک دو نقطه روی مرز جوش

جدول ۴- درصد وزنی و اتمی عناصر در آنالیز EDS برای

| نقطه ۱    |           |           |
|-----------|-----------|-----------|
| عنصر      | درصد وزنی | درصد اتمی |
| منیزیم    | ۲/۰۸      | ۲/۳۰      |
| آلومینیوم | ۹۷/۹۲     | ۹۷/۷۰     |
| مجموع     | ۱۰۰       | ۱۰۰       |

جدول ۵- درصد وزنی و اتمی عناصر در آنالیز EDS برای

| نقطه ۲    |           |           |
|-----------|-----------|-----------|
| عنصر      | درصد وزنی | درصد اتمی |
| اکسیژن    | ۰/۷۹      | ۱/۳۸      |
| سدیم      | ۰/۴۲      | ۰/۵۱      |
| منیزیم    | ۲/۰۵      | ۲/۳۴      |
| مس        | ۱/۱۴      | ۰/۵۰      |
| روی       | ۴/۸۳      | ۲/۰۵      |
| آلومینیوم | ۹۰/۷۶     | ۹۳/۲۳     |
| مجموع     | ۱۰۰       | ۱۰۰       |

نتایج آنالیز عنصری EDS از دو نقطه انتخابی در دو سوی فصل مشترک اتصال جوشکاری شده آلیاژهای آلومینیوم

- [5] Trishul, M. A., & Panda, B. (2020). A Review on the Challenges in Welding of Aluminium AA2219 Alloy. *Advances in Lightweight Materials and Structures: Select Proceedings of ICALMS 2020*, 663-671.
- [6] Praveen, P., & Yarlagadda, P. K. D. V. (2005). Meeting challenges in welding of aluminum alloys through pulse gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 164, 1106-1112.
- [7] Kazemi Nasrabadi, M., & Sadeghpour, K. (2019). Investigation of Shear Strength of the Bonding Region for Dissimilar Aluminum Alloy Sheets in Friction Stir Spot Welding Process. *J. Solid and Fluid Mech.*, 9(1), 125-138.
- [8] Ahmed, M. M., El-Sayed Seleman, M. M., Fydrych, D., & Çam, G. (2023). Friction stir welding of aluminum in the aerospace industry: the current progress and state-of-the-art review. *Materials*, 16(8), 2971.
- [9] Stephen Leon, J., Bharathiraja, G., & Jayakumar, V. (2020, October). A review on friction stir welding in aluminium alloys. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 954, No. 1, p. 012007). IOP Publishing.
- [10] Vahdati, M. (2020). Statistical analysis and optimization of parameters affecting the hardness of butt joint cross-section of Al7075 produced by FSW and SFSW using RSM and desirability approach. *J. Solid and Fluid Mechanics*, 10(4), 165-180.
- [11] Kumar Rajak, D., Pagar, D. D., Menezes, P. L., & Eyvazian, A. (2020). Friction-based welding processes: friction welding and friction stir welding. *J. Adhesion Sci. Tech.*, 34(24), 2613-2637.
- [12] Karimian Khozani, A., Alavi, S. A., Afshari, M., Afshari, H., Al-hedrewy, M., Samadi, M. R., & Beygi, R. (2025). An enhancement of the yield strength and hardness in the friction stir welding of AZ31/AA3105 joint. *J. Adhesion Sci. Tech.*, 39(3), 345-372.
- [13] Prabhakar, D. A. P., Korgal, A., Shettigar, A. K., Herbert, M. A., Chandrashekhara, M. P. G., Pimenov, D. Y., & Giasin, K. (2023). A review of optimization and measurement techniques of the friction stir welding (FSW) process. *J. Manufac. and Materials Processing*, 7(5), 181.
- [14] Mardalizadeh, M., Soleymani Yazdi, M. R., & Safarkhanian, M. (2013). Experimental evaluation of the tool rotation speed and feed rate on micro hardness and microstructure of 5456 aluminum alloy in friction stir welding process. *J. Solid Fluid Mech.*, 3(3), 1-10.
- [15] Gunasekaran, R., Gobinath, V. K., Suganeswaran, K., Nithyavathy, N., & Arun Kumar, S. (2024). Applications of friction stir welding. *Friction Stir Welding and Processing: Fundamentals to Advancements*, 245-258.

وجود دیمپل‌ها نشان‌دهنده جذب انرژی قابل توجه در هنگام شکست بوده و بیان‌گر رخداد تغییر شکل پلاستیک محلی پیش از شکست نهایی است. در بخش‌های کوچکی از سطح شکست نیز، سطوح صاف و تخت با الگوی مشخصه شکست ترد مشاهده می‌شود.

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق اتصال آلیاژهای غیر هم‌جنس آلومینیوم ۵۰۵۲ و ۷۰۷۵ آنیل شده در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور تأثیرات سرعت دورانی ابزار و سرعت پیشروی بر روی استحکام کششی، دمای اندازه‌گیری شده در فرایند و سختی مقطع جوش مورد بررسی قرار گرفت.

در سرعت دورانی ۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۲۰ میلیمتر بر دقیقه، بیشترین مقدار استحکام کششی اتصالات به دست آمد. که برابر با ۲۲۴/۲۰ مگاپاسکال می‌باشد. بیشترین دمای اندازه‌گیری شده برابر با ۲۵۱/۲۵ سانتی‌گراد می‌باشد. پارامترهای ورودی برای این آزمایش شامل سرعت دورانی ۱۲۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۳۰ میلیمتر بر دقیقه است. در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۲۰ میلیمتر بر دقیقه، بیشترین مقدار سختی ویکرز در مقطع جوش به دست آمد. که برابر با ۹۲/۳۷ می‌باشد.

#### مراجع

- [1] Li, S. S., Yue, X., Li, Q. Y., Peng, H. L., Dong, B. X., Liu, T. S., ... & Jiang, Q. C. (2023). Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry. *J. materials research and technology*, 27, 944-983.
- [2] D Udoeye, N. E., Inegbenebor, A. O., & Fayomi, O. S. I. (2019). The study on improvement of aluminium alloy for engineering application: A Review. *Int. J. Mech. Eng. Tech.*, 10(3).
- [3] Parvizi, P., Jalilian, M., Mirazizi, P. S., Zangeneh, M. R., & Amidi, A. M. (2025). Mechanical and physical properties of aluminum and its alloys for electrical conductors: A review. *Next Materials*, 9, 101090.
- [4] Musfirah, A. H., & Jaharah, A. G. (2012). Magnesium and aluminum alloys in automotive industry. *J. Appl. Sci. Research*, 8(9), 4865-4875.

- [24] Verma, S., & Misra, J. P. (2021). Experimental investigation on friction stir welding of dissimilar aluminium alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: J. Process Mech. Eng.*, 235(5), 1545-1554.
- [25] Pandian, V., & Kannan, S. (2020). Numerical prediction and experimental investigation of aerospace-grade dissimilar aluminium alloy by friction stir welding. *J. Manufac. Processes*, 54, 99-108.
- [26] Khanna, N., Sharma, P., Bharati, M., & Badheka, V. J. (2020). Friction stir welding of dissimilar aluminium alloys AA 6061-T6 and AA 8011-h14: a novel study. *J. the Brazilian Society of Mech. Sci. Eng.*, 42(1), 7.
- [27] Saravanan, R., Malladi, A., Amuthan, T., Aneesh, V. N., Jerin, A., Anbuezhayan, G., & Saikumar, A. (2023). Mechanical characterization of friction stir welded dissimilar aluminium alloy using Taguchi approach. *Materials Today: Proceedings*.
- [28] Ramesha, K., Sudersanan, P. D., & Santhosh, N. (2021). Design and optimization of the process parameters for friction stir welding of dissimilar aluminium alloys. *Engineering and Applied Science Research*, 48(3), 257-267.
- [29] Haribalaji, V., Boopathi, S., & Asif, M. M. (2022). Optimization of friction stir welding process to join dissimilar AA2014 and AA7075 aluminum alloys. *Materials Today: Proceedings*, 50, 2227-2234.
- [30] Mothilal, M., & Kumar, A. (2024). Optimization of friction stir welding process parameter in the joining of AA7075-T6/AA5083-O dissimilar aluminum alloy using response surface methodology. *Int. J. Pressure Vessels and Piping*, 211, 105282.
- [16] Gite, R. A., Loharkar, P. K., & Shimpi, R. (2019). Friction stir welding parameters and application: A review. *Materials Today: Proceedings*, 19, 361-365.
- [17] Unnikrishnan, M. A., Dhas, J. E. R., Lewis, K. A. S., Varghese, J. C., & Ganesh, M. (2023). Challenges on friction stir welding of magnesium alloys in automobiles. *Materials Today: Proceedings*.
- [18] Kumar, S., Mahajan, A., Kumar, S., & Singh, H. (2022). Friction stir welding: Types, merits & demerits, applications, process variables & effect of tool pin profile. *Materials today: proceedings*, 56, 3051-3057.
- [19] Gebreamlak, G., Palani, S., Sirhabizu, B., Atnaw, S. M., & Gebremichael, E. (2022). Dissimilar friction stir welding process-a review. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(4), 3900-3922.
- [20] Kaygusuz, E., Karaomerlioglu, F., & Akıncı, S. (2023). A review of friction stir welding parameters, process and application fields. *Turkish J. engineering*, 7(4), 286-295.
- [21] Yasavol, N., Bakhshi, S., Afshari, M., Asvadi, O., Reza Samadi, M., & Afshari, H. (2024). Optimizing the mechanical properties of the weld in the friction stir welding of Aluminum and Magnesium (A365–AZ91C). *J. Adv. Manufac. Sys.*, 23(03), 637-658.
- [22] Kilic, S., Ozturk, F., & Demirdogen, M. F. (2025). A comprehensive literature review on friction stir welding: Process parameters, joint integrity, and mechanical properties. *J. eng. research*, 13(1), 122-130.
- [23] Chekalil, I., Miloudi, A., Planche, M. P., & Ghazi, A. (2020). Prediction of mechanical behavior of friction stir welded joints of AA3003 aluminum alloy. *Fracture and Structural Integrity*, 14(54), 153-168.